

# Eliminating measurement errors when determining thickness of electrically conducting film applied to ferromagnetic body enables accurate measurement in presence of relatively large base material quality fluctuations

**Patent number:** DE19820546  
**Publication date:** 1999-11-04  
**Inventor:** DOBLER KLAUS (DE); HACHTEL HANSJOERG (DE); DIMKE REINHARD (DE); HEIDE FRANZ AUF DER (DE); BLATTERT RICHARD (DE); WEBER JOSEF (DE)  
**Applicant:** BOSCH GMBH ROBERT (DE)  
**Classification:**  
 - international: G01B7/06; G01D5/20  
 - european: G01B7/10C; G01B7/10D  
**Application number:** DE19981020546 19980508  
**Priority number(s):** DE19981020546 19980508

Also published as:

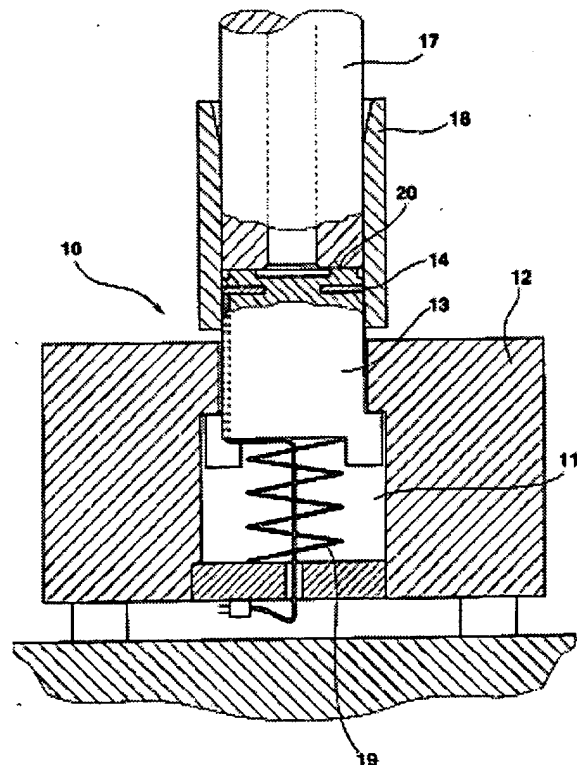
WO9958923 (A1)  
 EP0995075 (A1)  
 US6369565 (B1)  
 EP0995075 (B1)  
 CN1149385C (C)

*also included*

Report a data error here

## Abstract of DE19820546

Inductance of measurement coils carrying a.c. current is evaluated. The method involves evaluating the inductance of at least one measurement coil (14) carrying an a.c. current, whereby a dimensionless parameter is determined using the equation  $K = e \cdot \frac{LSA - L_0}{L_{\infty} - LSA}$ , where LSA is the inductance of the coil with respect to air;  $L_0$  is the inductance of the sensor coil when positioned on the uncoated metal surface of the base material;  $L_{\infty}$  is the coil inductance measured only with respect to the film material,  $e$  is a numerical factor and  $K$  is converted with an adjustment characteristic into a correction factor and the measured thickness  $DM$  is converted into a real thickness  $DW$  with  $DW = DM/F$ .



BEST AVAILABLE COPY

Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide



21 Aktenzeichen: 198 20 546.5-52  
22 Anmeldetag: 8. 5. 98  
43 Offenlegungstag: -  
49 Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 4. 11. 99

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

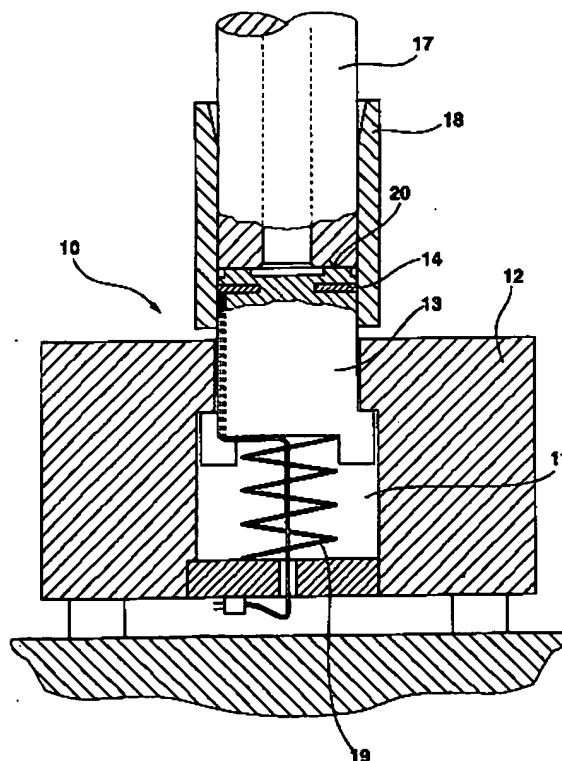
73 Patentinhaber:  
Robert Bosch GmbH, 70469 Stuttgart, DE

72 Erfinder:  
Dobler, Klaus, 70839 Gerlingen, DE; Hachtel,  
Hansjoerg, 71287 Weissach, DE; Dimke, Reinhard,  
70195 Stuttgart, DE; Heide, Franz auf der, 96123  
Litzendorf, DE; Blattert, Richard, 71711 Murr, DE;  
Weber, Josef, 71739 Oberriexingen, DE

55 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:  
DE 196 52 750 A1

54 Verfahren zur Eliminierung von Meßfehlern bei der Bestimmung einer Dicke einer Schicht aus elektrisch leitendem Material

57 Bei einem Verfahren zur Eliminierung von Meßfehlern bei der Bestimmung einer Dicke einer Schicht aus elektrisch leitendem Material werden die Meßfehler bedingt durch unterschiedliche Qualität des Grundstoffes eliminiert. Hierbei wird für jeden Grundstoff ein dimensionsloser Kennwert K ermittelt. Mit Hilfe einer Justierkennlinie kann jedem Kennwert K ein Korrekturfaktor F zugeordnet werden, mit dem der gemessene Wert der Schichtdicke  $D_M$  in einen realen Wert der Schichtdicke D umgewandelt werden kann. Unterschiedliche elektrische und magnetische Eigenschaften, bedingt durch die unterschiedliche Qualität des Grundstoffes, können somit weitgehend eliminiert werden.



## Beschreibung

## Stand der Technik

- 5 Die Erfindung geht aus von einem Verfahren zur Eliminierung von Meßfehlern bei der Bestimmung einer Dicke einer Schicht aus elektrisch leitendem Material, insbesondere einer Chromschicht, wie es zum Beispiel in der nachveröffentlichten DE 196 52 750 A1 beschrieben ist. Bei diesem Meßverfahren ist vorausgesetzt, daß die Qualität des Grundstoffes, auf den die Schicht aufgebracht ist, über eine Produktion hin gesehen relativ konstant ist und nur in geringen Grenzen schwankt. In der Massenproduktion können aber diese geringen Schwankungsgrenzen nur schwer eingehalten werden.
- 10 Dadurch kann es zu Meßungenauigkeiten bei der Bestimmung der Schichtdicke kommen.

## Vorteile der Erfindung

- Das erfindungsgemäße Verfahren zur Eliminierung von Meßfehlern bei der Bestimmung einer Dicke einer Schicht aus elektrisch leitendem Material mit den Merkmalen des unabhängigen Anspruchs hat demgegenüber den Vorteil, daß eine Schichtdickenbestimmung bei relativ großen Qualitätsschwankungen des Grundstoffes möglich ist. Der dadurch auftretende Meßfehler kann durch eine Vormessung weitgehend eliminiert werden. Insbesondere in der Massenproduktion weisen die von verschiedenen Zulieferern hergestellten Grundkörper unterschiedliche Qualitäten der Werkstoffeigenschaften und damit verbunden unterschiedliche elektrische und magnetische Eigenschaften auf. Diese Schwankungen der stofflichen Beschaffenheit des Grundstoffs können in relativ einfacher Weise eliminiert werden.
- 20 Durch die in den Unteransprüchen aufgeführten Maßnahmen sind vorteilhafte Weiterbildungen und Verbesserungen des im unabhängigen Anspruch angegebenen Verfahrens möglich.

## Zeichnung

- 25 Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung ist in der Zeichnung dargestellt und in der nachfolgenden Beschreibung näher erläutert. Die
- Fig. 1 zeigt einen schematischen Aufbau der Meßvorrichtung, in der
- Fig. 2 ist der Verlauf der Induktivität  $L$  der Meßspule über die Dicke  $a$  der zu bestimmenden Schicht bei unterschiedlichen Abständen und bei unterschiedlicher stofflicher Beschaffenheit  $\alpha$  bzw.  $\beta$  des sich unter der zu bestimmenden Schicht befindlichen Materials dargestellt. In der
- Fig. 3 ist das Verhältnis der in Fig. 2 verwendeten unterschiedlichen Abstände zwischen der Meßspule und dem Meßobjekt dargestellt.
- Fig. 4 zeigt den Verlauf der Normwerte  $M_e$  über der Schichtdicke  $a$ .
- 35 Fig. 5 zeigt ein Blockschaltbild des Verfahrens und
- Fig. 6 den Verlauf der Normwerte  $M_e$  über der Schichtdicke  $a$ .
- Fig. 7 zeigt ein weiteres Blockschaltbild einer Abwandlung des Verfahrens und
- Fig. 8 eine Abwandlung des beim Meßverfahren verwendeten Eichkörpers und
- Fig. 9 eine Abwandlung des beim Meßverfahren verwendeten Meßkörpers. In der
- 40 Fig. 10 ist der Verlauf der Normwerte  $M_e$  über der Schichtdicke  $a$  bei unterschiedlicher Qualität des Grundstoffes dargestellt. Die
- Fig. 11 zeigt ferner den Verlauf des Korrekturfaktors  $F$  über den Kennwert  $K$ , der die Qualität des Basismaterials des Grundstoffes beschreibt.

## Beschreibung des Ausführungsbeispiels

- Im folgenden wird zuerst das in der DE 196 52 750 A1 beschriebene Meßverfahren erläutert, das durch das erfindungsgemäße Korrekturverfahren verbessert wird. Das Meßverfahren selbst beruht auf dem sog. Induktiv-Wirbelstrommeßverfahren.
- 50 In der Fig. 1 ist ein dafür verwendeter Sensor 10 konstruktiv dargestellt. Der Sensor 10 ist in der Ausnehmung 11 eines Grundkörpers 12 angeordnet und besteht aus einem Spulenkörper 13 auf dem eine von einem hochfrequenten Wechselstrom, zum Beispiel 4 MHz, durchflossene Spule 14 angebracht ist. Die Spule 14 kann zum Beispiel als Flachspule oder Ringspule ausgebildet sein. Der Spulenkörper 13 besteht vorzugsweise aus elektrisch nicht leitendem und nicht ferromagnetischem Material, zum Beispiel Kunststoff, und wird nahezu reibungsfrei in der Ausnehmung 11 geführt. Das zu
- 55 überwachende Bauteil 17 ist in einen Führungskörper 18 eingebracht, der das Bauteil 17 und die Spule 14 zueinander positioniert. Mit Hilfe einer Feder 19 wird der Spulenkörper 13 und somit die Spule 14 gegen die Oberfläche 20 des Bauteils 17 gedrückt. Die Oberfläche 20 weist die zu bestimmende Schicht auf. Beim Bauteil 17 kann es sich zum Beispiel um den Stutzen eines Einspritzventils handeln, wobei die Schicht 20 dann eine Chromschicht darstellt. Fließt durch die Spule 14 ein Wechselstrom, so wird ein magnetisches Wechselfeld erzeugt, das sowohl die Chromschicht 20 als auch die
- 60 darunterliegende Materialschicht aus ferromagnetischem Material des Bauteils 17 durchdringt. In der Chromschicht 20 wirkt dann nur der Wirbelstromeffekt, während im ferromagnetischen Material des Grundkörpers 17 der Induktiv- und Wirbelstromeffekt wirksam sind. Im folgenden werden nun die jeweiligen Meßeffekte einzeln erläutert, die auftreten würden, wenn das jeweilige andere Teil nicht vorhanden wäre. Wird die Spule 14 von einem Wechselstrom durchflossen und erfaßt das magnetische Wechselfeld der Spule nur ein elektrisch gut leitendes aber nicht ferromagnetisches Material, d. h. nur die Chromschicht 20 würde vom magnetischen Wechselfeld der Spule erfaßt, so wirkt nur der sog. Wirbelstrom-
- 65 effekt. Aufgrund der sich in dem elektrisch gut leitenden, aber nicht ferromagnetischen Material ausbildenden Wirbelströme ergibt sich eine Verminderung der Induktivität der Spule 14.

Im folgenden wird nun die Wirkung des magnetischen Feldes der von einem Wechselstrom durchflossenen Spule 14

auf das ihr gegenüberliegende ferromagnetische Material, d. h. auf das Material des Grundkörpers 17 beschrieben. Das magnetische Wechselfeld der von dem Wechselstrom durchflossenen Spule erfaßt das Material des Grundkörpers 17. Es sei darauf hingewiesen, daß bei elektrisch leitendem und ferromagnetischem Material sowohl der ferromagnetische Effekt als auch der Wirbelstromeffekt wirkt. Während der Wirbelstromeffekt eine Verminderung der Induktivität der Meßspule hervorruft, bewirkt der ferromagnetische Effekt eine Erhöhung der Induktivität der Meßspule. Welcher von beiden Effekten überwiegt, ist primär von der Frequenz des Wechselstroms, der die Spule 14 durchfließt, und von der Stoffbeschaffenheit des Grundkörpers 17 abhängig. Überträgt man diese beiden Meßeffekte auf den Grundkörper 17 mit der Chromschicht 20, so läßt sich feststellen, daß je dicker die Chromschicht 20 ist, desto schwächer bildet sich das Magnetfeld aus und damit ist die Induktivität der Spule 14 schwächer. In der Fig. 2 ist mit  $\alpha 1$  eine entsprechende Meßkurve dargestellt, die den abnehmenden Verlauf der Induktivität der Meßspule 14 über die zunehmende Dicke der Chromschicht 20 darstellt.

Der Verlauf der Meßkurve der Induktivität L über der Schichtdicke a hängt aber von der stofflichen Beschaffenheit des Grundkörpers 17, d. h. zum Beispiel von dem elektrischen Widerstand, der Permeabilität des Materials und vom Abstand zwischen der Spule 14 und der Oberfläche 20, die gemessen werden soll, ab. Verändert sich zum Beispiel bedingt durch Verschmutzungen oder durch Abnutzung des Spulenkörpers der Abstand zwischen der Meßspule 14 und der Chromschicht 20, so ergeben sich unterschiedliche Kennlinien des Verlaufs der Induktivität L über der Schichtdicke a. In der Fig. 2 sind hier verschiedene Beispiele dargestellt. Die Kennlinien  $\alpha 2$ ,  $\alpha 3$  und  $\alpha 4$  stellen hierbei den Verlauf der Induktivität L über der Schichtdicke a bei unterschiedlichem Abstand zwischen der Meßspule und der zu überwachenden Chromschicht aber bei gleicher stofflicher Beschaffenheit des Grundkörpers 17 dar. In der Fig. 3 ist hierbei die Größe des Abstandes  $\alpha$  zwischen der Spule 14 und der zu überwachenden Chromschicht 20 dargestellt. Es ist ersichtlich, daß der Abstand von  $\alpha 1$  zu  $\alpha 4$  immer größer wird. Würde man hingegen die stoffliche Beschaffenheit des Materials des Grundkörpers 17 verändern, so würden sich die Kennlinien  $\beta 1$  bis  $\beta 4$  ergeben. Die Kennlinien  $\beta 1$  bis  $\beta 4$  bedeuten wiederum eine Variation des Abstands zwischen der Meßspule und der zu überwachenden Chromschicht bei einer zweiten stofflichen Beschaffenheit des Grundkörpers. Aus dem Diagramm nach der Fig. 2 ist erkenntlich, daß einem gemessenen Induktivitätswert L eine Vielzahl möglicher Schichtdicken zugeordnet werden kann. Statt der Induktivität kann auch der Wechselstromwiderstandswert der Spule ausgewertet werden.

Das Meßverfahren ermöglicht nun auch eine eindeutige Zuordnung zwischen den gemessenen Induktivitätswerten L der Meßspule 14 und der Dicke a der Chromschicht 20, wenn sich die stoffliche Beschaffenheit des Grundkörpers 17 und/oder der Abstand zwischen der Meßspule 14 und der Oberfläche der zu bestimmenden Chromschicht ändert. Kern des Verfahrens ist es, eine Normung durchzuführen, die auftretende Meßfehler eliminiert und einen eindeutigen zuordbaren Meßwert ermittelt.

Das Verfahren zur Bestimmung der Dicke einer Schicht wird in mehreren Meß- und Auswerteschritten durchgeführt. Vor der Beschichtung des Grundkörpers 17 wird in einer sog. Vormessung ein Induktivitätswert  $L_0$  der Spule 14 ermittelt. Hierbei sitzt die Spule 14 möglichst direkt auf der noch unbeschichteten der Spule zugewandten Oberfläche (Meßfläche) des Grundkörpers 17 auf. Es erfolgt somit nur eine Messung gegenüber dem Material des Grundkörpers 17. Die Größe des Induktivitätswerts  $L_0$  hängt von der Beschaffenheit des Grundkörpers ab, insbesondere von dessen magnetischen und elektrischen Eigenschaften. Diese Beschaffenheit des Grundkörpers 17 kann in einer Serienfertigung schwanken. Deshalb ist der Induktivitätswert  $L_0$  zu Beginn der Messung für jeden einzelnen Grundkörper 17 zu ermitteln und auch zuordbar in einem Datenspeicher abzuspeichern.

Anschließend wird nun der Grundkörper 17 in einer entsprechenden Beschichtungsanlage mit einer Chromschicht 20 versehen. Danach erfolgt eine zweite Messung, d. h. eine sog. Nachmessung, die an derselben Stelle des Grundkörpers 17 wie die oben erwähnte Vormessung durchgeführt wird. Dabei ergibt sich ein Induktivitätswert  $L_X$  der Meßspule 14. Die Größe des Induktivitätswerts  $L_X$  wird u. a. von der Dicke der Chromschicht 20 und von der stofflichen Beschaffenheit des Grundkörpers 17 bestimmt. Es ist sicherzustellen, daß beide ermittelten Induktivitätswerte  $L_0$  bzw.  $L_X$  jeweils eindeutig demselben Grundkörper 17 zuzuordnen sind. Diese beiden Induktivitätswerte  $L_0$  bzw.  $L_X$  werden nun mit Hilfe eines Algorithmuses in Normwerte umgeformt, d. h. in dimensionslose Kennzahlen, die einer entsprechenden Schichtdicke zuordbar sind. Um diese Normwertbildung durchführen zu können, muß der Induktivitätswert  $L_\infty$  ermittelt werden. Diesen Induktivitätswert  $L_\infty$  erhält man, wenn an einem Eichkörper eine Messung ausschließlich gegenüber einer Chromschicht durchgeführt wird. Die Oberfläche des Eichkörpers muß dabei eine so dicke Chromschicht aufweisen, daß sie das gesamte Magnetfeld der Spule abschirmt, so daß im ferromagnetischen Grundstoff des Eichkörpers weder der induktive noch der Wirbelstromeffekt sich auswirken kann. Gegebenenfalls könnte beim Eichkörper an Stelle von Chrom auch ein anderer elektrisch leitender, jedoch nicht ferromagnetischer Stoff als Ersatz verwendet werden. Entsprechend der Gleichung (1) wird nun der Normwert Me ermittelt. Der Faktor 1000 kann beliebig zwischen Null und Unendlich variiert werden.

$$(1) \quad Me = 1000 \cdot \frac{L_X - L_0}{L_\infty - L_0}$$

Me = Meßwert/Normwert

$L_0$  = Induktivitätswert (unbesch. Grundkörper)

$L_X$  = Induktivitätswert (beschichtetes Teil)

$L_\infty$  = Induktivitätswert (Eichkörper aus Chrom)

In der Fig. 4 ist nun der Verlauf  $\gamma$  der entsprechend der Gleichung (1) normierten Meßwerte Me über der Schichtdicke a dargestellt. Die verschiedenen in der Fig. 2 dargestellten Kurven ergeben einen nahezu zusammenfallenden Verlauf  $\gamma$  der jeweils ermittelten Normwerte Me. Es ist ersichtlich, daß in der Fig. 4 gegenüber der Fig. 2 eine eindeutige Zuordnung eines Normwerts Me zu einer Dicke der Schicht 20 möglich ist.

Mit Hilfe der Gleichung (1) wurden bisher die Fehler nahezu eliminiert, die durch unterschiedlich große Abstände

zwischen der Meßspule und der zu bestimmenden Schicht und durch unterschiedliche magnetische bzw. elektrische Eigenschaften des Materials des Grundkörpers 17 entstehen. Es ist aber auch noch möglich, den Einfluß der unter anderem durch Temperaturschwankungen entstehenden sog. Offsetdrift auf das Meßergebnis zu unterdrücken. Hierzu ist auch der Induktivitätswert der Meßspule zu erfassen, der sich ergibt, wenn die Meßspule ausschließlich gegen Luft mißt, d. h. wenn ihr weder eine Chromschicht noch irgendein Bauteil gegenüberliegt. Dieser Meßwert wird im folgenden als Urluftwert  $L_{l\infty}$  bezeichnet. Er wird ermittelt kurz vor oder nachdem (möglichst zeitgleich) der Induktivitätswert  $L_{\infty}$  mit Hilfe eines Eichkörpers ermittelt wird. Dieser Wert  $L_{l\infty}$  stellt einen Basiswert dar, der für die nachfolgenden Messungen jeweils verwendet wird. Während der individuellen Messung des einzelnen Grundkörpers 17 wird kurz vor oder nach der oben erwähnten sog. Vormessung, d. h. möglichst zeitgleich zur Ermittlung des Induktivitätswertes  $L_0$  der Spule ein Induktivitätswert  $L_{l0}$  ermittelt, der entsteht, wenn die Meßspule wiederum gegen Luft mißt. Anschließend erfolgt zum Beispiel in einem Mikrocomputer eine Differenzbildung  $\Delta L_0 = L_{l0} - L_{l\infty}$ . Mit Hilfe dieses Wertes  $\Delta L_0$  werden nun korrigierte Induktivitätswerte  $L_0^* = L_0 - \Delta L_0$  errechnet. Sinngemäß ist auch bei der Messung des Induktivitätswertes  $L_X$  der korrigierte Meßwert  $L_X^*$  zu ermitteln. Hierbei wird zeitlich kurz vor oder nach der oben erwähnten sog. Nachmessung, d. h. kurz vor oder nach der Ermittlung des Wertes  $L_X$  der Induktivitätswert der Spule gegenüber Luft erfaßt, der mit  $L_{lX}$  bezeichnet wird. Der Wert der Spule gegenüber Luft ist hier nochmals zu ermitteln, da ein zeitlicher Unterschied und somit eine Temperaturschwankung zwischen der Erfassung des Induktivitätswertes der Spule gegenüber Luft bei der sog. Vormessung und bei der sog. Nachmessung vorhanden sein kann. Der einmal ermittelte sog. Urluftwert  $L_{l\infty}$  kann sowohl bei der Korrektur des Induktivitätswertes  $L_0$  bzw. des Induktivitätswertes  $L_X$  über einen längeren Zeitraum verwendet werden. Auch ist es ausreichend, wenn der Induktivitätswert  $L_{\infty}$ , der den Induktivitätswert einer Messung ausschließlich gegenüber einer Chromschicht darstellt, nur intervallartig aufgenommen wird und für längere Zeit in einer Datenbank gespeichert wird. Wird aber der Induktivitätswert  $L_{\infty}$  neu aufgenommen, um z. B. eine langsame und kontinuierliche Veränderung des Abstands zwischen der Meßspule und dem Meßobjekt (z. B. Abrieb) zu berücksichtigen, so ist gleichzeitig auch der sog. Urluftwert  $L_{l\infty}$  zu erneuern. Um nun bei der Normwertbildung auch die Offsetdrift des Meßergebnisses, die durch Temperaturschwankungen hervorgerufen wird, zu berücksichtigen, ist die Gleichung 2 zu verwenden.

$$(2) \quad Me = 1000 \cdot \frac{(L_X - (L_{lX} - L_{l\infty})) - (L_0 - (L_{l0} - L_{l\infty}))}{L_{\infty} - (L_{l0} - L_{l\infty})}$$

Bei Austausch eines Sensors müssen der Induktivitätswert  $L_{\infty}$  und  $L_{l\infty}$  neu aufgenommen werden. Erfolgt der Austausch zwischen Vor- und Nachmessung muß auch bei der Nachmessung der alte Bezugswert  $L_{l\infty}$  verwendet werden.

Bei manchen Materialien für den Grundkörper 17 ändern sich über längere Zeitabläufe betrachtet die elektrischen und magnetischen Werte des Materials des Grundkörpers. Diese Veränderung, d. h. Drift, kann bei jedem zu bestimmenden Meßkörper unterschiedlich groß sein, da diese Drift neben der Stoffbeschaffenheit auch von der individuellen Wärmebehandlung, die vor dem Verchromen erfolgt, abhängt. Für die Aufnahme von Justierkennlinien, siehe Fig. 4, werden deshalb Eichkörper, wie sie in der Fig. 8 dargestellt sind, hergestellt. Der Eichkörper 30 weist zwei Stirnflächen 31 und 32 auf. Die Meßfläche 31 besteht hier aus dem unbeschichteten Grundstoff und die Meßfläche 32 ist mit der Chromschicht versehen. Beide Meßflächen 31 und 32 sind aber formgleich. Die Dicke der Chromschicht, die auf die Meßfläche 32 aufgebracht ist, ist bekannt. Der bei der Eichung mit diesem Eichkörper 30 ermittelte Normwert ändert sich nicht oder nur unwesentlich, auch wenn sich die elektrischen und magnetischen Eigenschaften des Grundstoffes, bedingt durch Alterungsprozesse verändern. Vorausgesetzt ist hierbei eine homogene Änderung der magnetischen und elektrischen Eigenschaften des Grundstoffs über den gesamten Eichkörper.

Im folgenden werden die einzelnen Meß- und Berechnungsschritte nochmals anhand des Diagramms nach Fig. 5 aufgelistet. Das Meßverfahren läuft, wie erläutert grob, in drei Schritten ab, einer sog. Eichwerterfassung, einer sog. Vormessung und einer sog. Nachmessung. In der Eichwerterfassung wird der Induktivitätswert  $L_{\infty}$  erfaßt, der ausschließlich gegenüber dem Material (bzw. dessen Ersatzstoff) bestimmt wird, dessen Dicke ermittelt wird, wobei die Stärke des Eichkörpers vorzugsweise größer als die Eindringtiefe des magnetischen Wechselfeldes der Meßspule ist. Anschließend wird der Induktivitätswert  $L_{l\infty}$  ermittelt, der den Induktivitätswert der Meßspule gegenüber Luft möglichst im Zeitpunkt der Erfassung des Werts  $L_{\infty}$  darstellt.

Nun beginnt der sog. Vormessungsabschnitt.

3. Erfassung des aktuellen Induktivitätswertes der Spule gegenüber Luft  $L_{l0}$
4. Differenzbildung  $\Delta L_0 = L_{l0} - L_{l\infty}$ .
5. Ermittlung des Induktivitätswertes  $L_0$ , d. h. des Induktivitätswertes gegenüber dem unbeschichteten Grundkörper.
6. Ermittlung des korrigierten Werts  $L_0^*$  entsprechend der Differenzbildung  $L_0^* = L_0 - \Delta L_0$

Nun folgen die Berechnungsschritte der sog. Nachmessung:

7. Ermittlung des Induktivitätswertes der Spule gegenüber Luft  $L_{lX}$
8. Bilde die Differenz  $\Delta L_X = L_{lX} - L_{l\infty}$
9. Ermittlung des Induktivitätswertes  $L_X$
10. Ermittlung des korrigierten Wertes  $L_X^*$  durch Differenzbildung:  $L_X^* = L_X - \Delta L_X$
11. Durchführung der Normwertberechnung entsprechend der Gleichung mit den Werten  $L_{\infty}$ , und  $L_X^*$  bzw.  $L_0^*$
12. Umwandlung des unter 11 ermittelten Normwertes in eine Schichtdicke mit Hilfe einer Eichkurve.

In einer Abwandlung des Verfahrens wird der Induktivitätswert  $L_0$  nicht mehr bei jedem einzelnen Bauteil individuell

gegenüber diesem ermittelt, sondern nun mit Hilfe eines Eichelements gemessen und abgespeichert. Dieses Justierteil darf aber seine elektrischen und magnetischen Eigenschaften während der Betriebsdauer der Anlage nicht verändern. Der Induktivitätswert  $L_{\infty}$  wird wie oben beschrieben ermittelt. Im folgenden werden nun die Meßschritte entsprechend Fig. 7 dargelegt, wobei zur Vereinfachung und aus Übersichtlichkeitsgründen die Korrektur der Drift der Temperatur nicht berücksichtigt ist. Für diese Abwandlung des Verfahrens ist es erforderlich, für jedes Material eine eigene Umwandlungseichkurve entsprechend Fig. 6 aufzunehmen, die mit den gleichen unter Schritt 1 verwendeten Eichelementen aufgenommen sind.

#### Schritt 1

1. Aufnahme des Induktivitätswerts  $L_{\infty}$  und Speicherung in Datenbank
2. Aufnahme des Induktivitätswertes  $L_0$  gegenüber einem Eichelement und Speicherung in Datenbank.

#### Schritt 2

3. Ermittlung des Induktivitätswerts  $L_0$  an einem unbeschichteten Bauteil
4. Errechnung des Normwerts  $M_e$  mit Hilfe der Gleichung 1 bei Schichtdicke Null.
5. Auswahl der materialbezogenen Umwandlungseichkurve gemäß Fig. 6.

#### Schritt 3

6. Ermittlung des Induktivitätswertes  $L_X$  an einem beschichteten Bauteil
7. Berechnung des Normwertes mit Hilfe der Gleichung 1
8. Umsetzung der Normwerte in Schichtdickenwerte mit Hilfe einer ausgewählten Eichkurve.

Anzumerken ist, daß bei dem Verfahren gegenüber dem beim Stand der Technik verwendeten Wirbelstromverfahren bzw. Induktivverfahren die Meßspule von einem hochfrequenten Wechselstrom, z. B. 4 MHz durchflossen wird. Dabei ergeben sich kleinere Spuleninduktivitäten. Es ist kein Spulenkern erforderlich, so daß eine variable und preiswerte Bauweise möglich ist.

Durch Einsatz eines sog. Multiplexers ist es möglich, viele Meßteile in kurzer Zeit vermessen zu können. Hierbei sind viele Meßspulen gleichzeitig den zu bestimmenden Meßflächen zugeordnet. Kurzzeitig nacheinander werden von einer Meßbrücke mittels des Multiplexers diese Meßflächen abgetastet. Dies ist möglich, auch wenn mit der oben erwähnten hohen Meßfrequenz von z. B. 4 MHz die Induktivitätswerte ermittelt werden.

In der Fig. 9 ist eine weitere Ausgestaltung der konstruktiven Anordnung nach Fig. 1 dargestellt. Die im Verfahren beschriebene Erfassung des Induktivitätswerts  $L_0$  (Messung der Spule gegenüber unbeschichtetem Bauteil) kann auch mit einer separaten zweiten Meßspule 40 erfolgen. Hierzu muß nach der Verchromung, d. h. nach Aufbringen der Schicht, deren Dicke zu messen ist, auf der Oberfläche des zu überwachenden Bauteils noch eine nicht beschichtete Zone vorhanden sein. Bei dem in der Fig. 9 dargestellten Bauteil 41 ragt ein Fortsatz 44 des Spulenkörpers 42 in eine Bohrung 43 des Bauteils 41. Die Wandung der Bohrung 43 ist hierbei nicht mit der zu bestimmenden Chromschicht bedeckt. Mit Hilfe der Spule 40 kann nun die elektrische und magnetische Eigenschaft des Grundkörpers ermittelt werden, während gleichzeitig mit Hilfe der Meßspule 14 eine Messung gegenüber der zu bestimmenden Chromschicht erfolgen kann. Mit Hilfe dieses Sensors ist es möglich, daß das Bauteil nur einmal auf dem Sensor positioniert werden muß, so daß eine noch kürzere Taktzeit entsteht.

Bei dem bisher beschriebenen Meßverfahren wurde davon ausgegangen, daß die Qualität des Grundstoffes nur in sehr geringen Grenzen schwankt. Dies gilt insbesondere für die Fig. 2 und 4. Wird der Grundstoff bei einer Massenproduktion aber zum Beispiel von verschiedenen Herstellern angeliefert, so können Qualitätsunterschiede mit größeren Schwankungen auftreten. Diese Schwankungen können zum Beispiel durch unterschiedliche Glühverfahren des Grundstoffes hervorgerufen sein, was aber Veränderungen der Permeabilität des Grundstoffes bedingt. Diese größeren Schwankungen bewirken somit eine Veränderung der magnetischen und elektrischen Eigenschaften des Grundstoffes, wodurch, ohne daß unterschiedliche Schichtdicken vorliegen würden, unterschiedliche Meßsignale erzeugt würden. Mit Hilfe des anschließend beschriebenen Korrekturverfahrens wird nun dieser Einfluß von Schwankungen der stofflichen Beschaffenheit des Grundstoffes auf das Meßsignal weitgehend eliminiert. In der Fig. 4 ist man bisher von nahezu zusammenfallenden Meßkurven bei relativ geringfügig unterschiedlichen Grundstoffen ausgegangen. Bedingt durch die oben erwähnte große unterschiedliche Qualität des Grundstoffes ergeben sich, in der Fig. 10 dargestellt, unterschiedliche Kurven, die den Zusammenhang zwischen  $M_e$  und  $a$  darstellen. Die Anfangs- und Endpunkte aller Meßkurven würden zusammenfallen. Zur Fehlereliminierung muß nun zuerst ein Kennwert  $K$  ermittelt werden, der die Qualität des Grundstoffes beschreibt und somit eine Aussage über die Qualität des Grundstoffes ermittelt. Hierzu wird von der oben beschriebenen Vormessung der Induktivitätswert  $L_0$  der Sensorspule benutzt. Dieser Wert  $L_0$  wird anschließend mit Hilfe eines Algorithmuses in einen dimensionslosen Kennwert  $K$  umgeformt. Die Größe dieses Kennwertes  $K$  bestimmt den Wert eines daraus abgeleiteten Korrekturfaktors  $F$ , mit dem das gemessene Meßsignal der Dicke der Beschichtung korrigiert werden kann. Selbstverständlich muß für jedes einzelne Meßobjekt der Wert  $L_0$  ermittelt werden. Der Kennwert  $K$  errechnet sich nun nach folgender Beziehung:

$$K = e * \frac{L_{SA} - L_0}{L_{\infty}^* - L_{SA}}$$

$e$  ist ein Zahlenfaktor (z. B. 100) um anschauliche Kenngrößenwerte zu erhalten. Er kann auch eventuell Eins sein.

Ferner ist  $L_{SA}$  der Induktivitätswert der Sensorspule gemessen gegenüber Luft

$L_0$  der Induktivitätswert der Sensorspule, wobei die Spule auf der unbeschichteten Meßfläche des Grundstoffes positioniert ist

$L_{\infty}$  der Induktivitätswert der Sensorspule, wobei die Spule auf einer chrombeschichteten Meßfläche positioniert ist, d. h. die Schichtdicke von zum Beispiel Chrom ist viel dicker als die Eindringtiefe des Wechselfeldes der Spule, was bedeutet, daß die Spule nur gegenüber dem Material der Schicht mißt.

Dieser Kennwert  $K$  erfaßt, weitgehend unabhängig von der Meßempfindlichkeit der Meßspule, im weitesten Sinn die elektrischen und magnetischen Eigenschaften des Grundstoffes. Da diese Eigenschaften die Höhe des Meßsignals beeinflussen, wie der obigen Ausführung zur Ermittlung des Meßwertes zu entnehmen ist, kann der Kennwert  $K$  zur Korrektur des ermittelten Meßwertes der Schichtdicke herangezogen werden.

Dieser Kennwert  $K$  muß nun in einem Korrekturfaktor  $F$  zur Meßfehlereliminierung der für die Schichtdicke gemessenen Meßwerte umgewandelt werden. Dieser Korrekturfaktor  $F$  wird zum Beispiel mit Hilfe der in Fig. 11 dargestellten Justierkennlinie ermittelt. Im Diagramm nach Fig. 11 ist ein linearer Zusammenhang zwischen dem Korrekturfaktor  $F$  und dem Kennwert  $K$ , der der Gleichung

$$F_X = b \cdot K_X + c$$

entspricht, unterstellt. In dieser Gleichung entspricht

$b$  der Steigung der Justierkennlinie und

$c$  dem Anfangswert der Kurve.

Diese Justierkennlinie wird nun so ermittelt, daß Meßobjekte mit unterschiedlichen Kennwerten  $K$  gleich beschichtet werden, z. B. mit der Nennschichtdicke des zu prüfenden Teils. Diese Schichtdicke wird nun zuerst mit dem oben beschriebenen Verfahren gemessen und mit einem anderen Verfahren, z. B. im Schliffbild, verifiziert. Durch die Beziehung

$$F = \frac{D_M}{D_W}$$

kann für die Kennwerte  $K$  der einzelnen Meßobjekte der jeweilige Korrekturfaktor  $F$  ermittelt werden.

Dabei bedeutet

$D_W$  die wirkliche Schichtdicke, wie sie z. B. im Schliffbild gemessen wird und

$D_M$  die mit Hilfe des oben erwähnten Meßverfahrens bestimmte Schichtdicke.

Diese für verschiedene Meßobjekte ermittelten Kennwerte  $K$  und Korrekturfaktoren  $F$  werden in ein Diagramm nach der Fig. 11 eingetragen. Der Verlauf der sich daraus ergebenden Kurve ist auch abhängig vom Trägermaterial des Meßobjekts. Der Kurvenverlauf kann auch nahezu linear sein. In diesem Fall lassen sich die Faktoren  $b$  und  $c$  der oben genannten Gleichung  $F_X = b \cdot K_X + c$  ermitteln, so daß sich die Umsetzung der Kennwerte in Korrekturfaktoren einfach bewerkstelligen läßt. Falls man keine linearen Verhältnisse unterstellen kann, muß die Umsetzung der Kennwerte in Korrekturfaktoren mittels tabellarisch hinterlegter Werte erfolgen.

Die größte Korrekturgenauigkeit erhält man, wenn die oben erwähnte Nennschichtdicke auch weitgehend der Dicke der anschließend zu messenden und zu korrigierenden Schicht entspricht.

Nach Ermittlung dieser in Fig. 11 dargestellten Justierkennlinie kann jedem Kennwert  $K$  ein Korrekturfaktor  $F$  zugeordnet werden. Somit kann im weiteren jeder ermittelten Schichtdicke  $D_M$  mit Hilfe des Korrekturfaktors  $F$  entsprechend der Beziehung

$$D_W = \frac{D_M}{F}$$

die reale Schichtdicke  $D_W$  ermittelt werden.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Eliminierung von Meßfehlern bei der Bestimmung einer Dicke einer Schicht (20) aus elektrisch leitendem Material, die auf einem Körper (17) aus ferromagnetischem Material aufgebracht ist, mit Hilfe mindestens einer von einem Wechselstrom durchflossenen Meßspule (14), deren Induktivitätsänderung ausgewertet wird, wobei ein dimensionsloser Kennwert ( $K$ ) mit Hilfe der Gleichung

$$K = e \cdot \frac{L_{SA} - L_0}{L_{\infty} - L_{SA}},$$

ermittelt wird, wobei

$L_{SA}$  der Induktivitätswert der Sensorspule gegenüber Luft ist,

$L_0$  der Induktivitätswert der Sensorspule ist, wobei die Spule auf der unbeschichteten Meßfläche des Grundstoffes positioniert ist,

$L_{\infty}$  der Induktivitätswert der Sensorspule ist, wobei die Spule nur gegenüber dem Material der Schicht mißt,

$e$  ein Zahlenfaktor ist, und

wobei der Kennwert ( $K$ ) mit Hilfe einer Justierkennlinie in einen Korrekturfaktor ( $F$ ) umgewandelt wird und wobei

der gemessene Dickenwert ( $D_M$ ) in einen realen Dickenwert ( $D_W$ ) mit Hilfe der Gleichung

$$D_W = \frac{D_M}{F}$$

5

umgewandelt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Justierkennlinie nahezu linear verläuft.

Hierzu 6 Seite(n) Zeichnungen

10

15

20

25

30

35

40

45

50

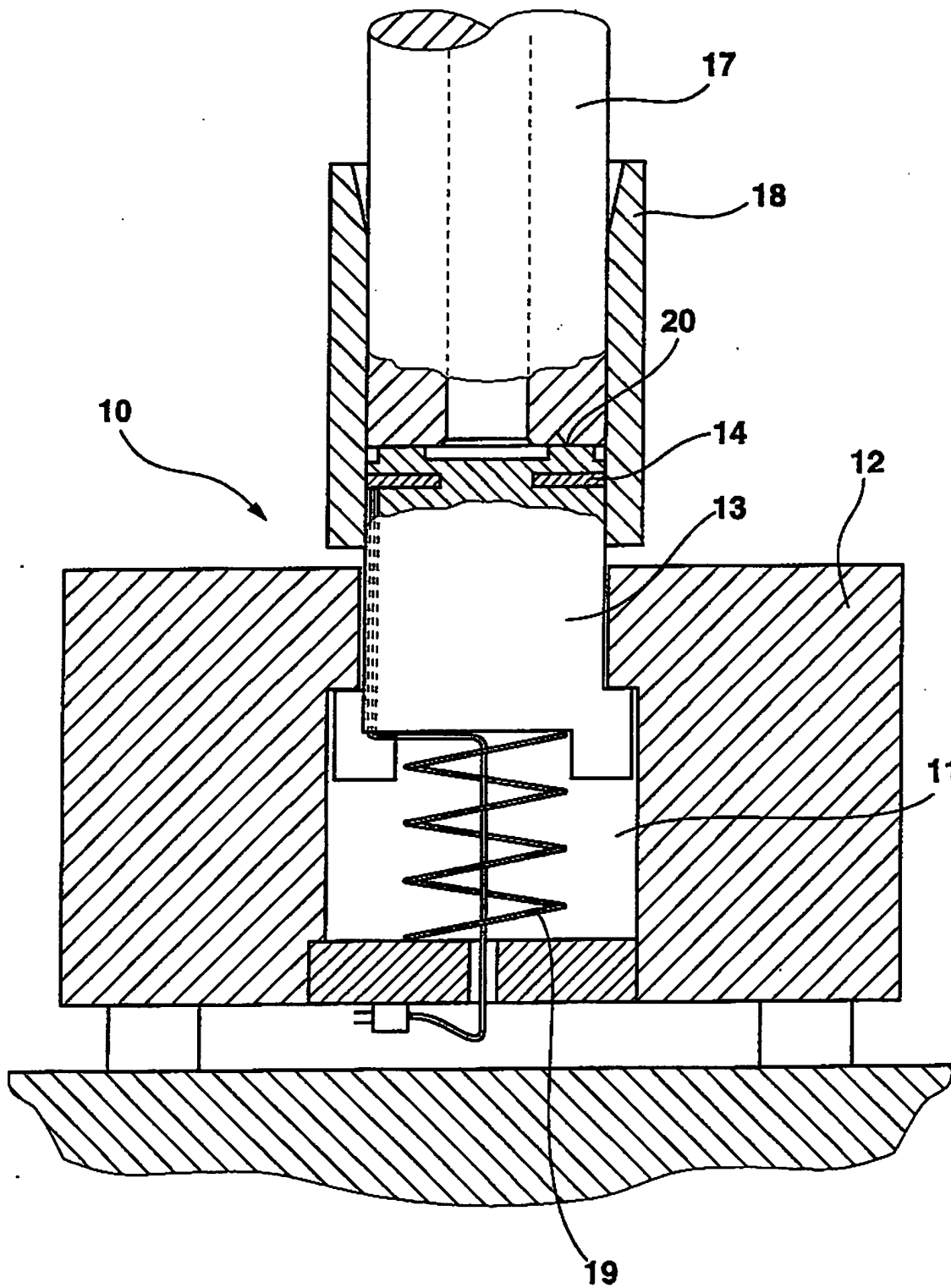
55

60

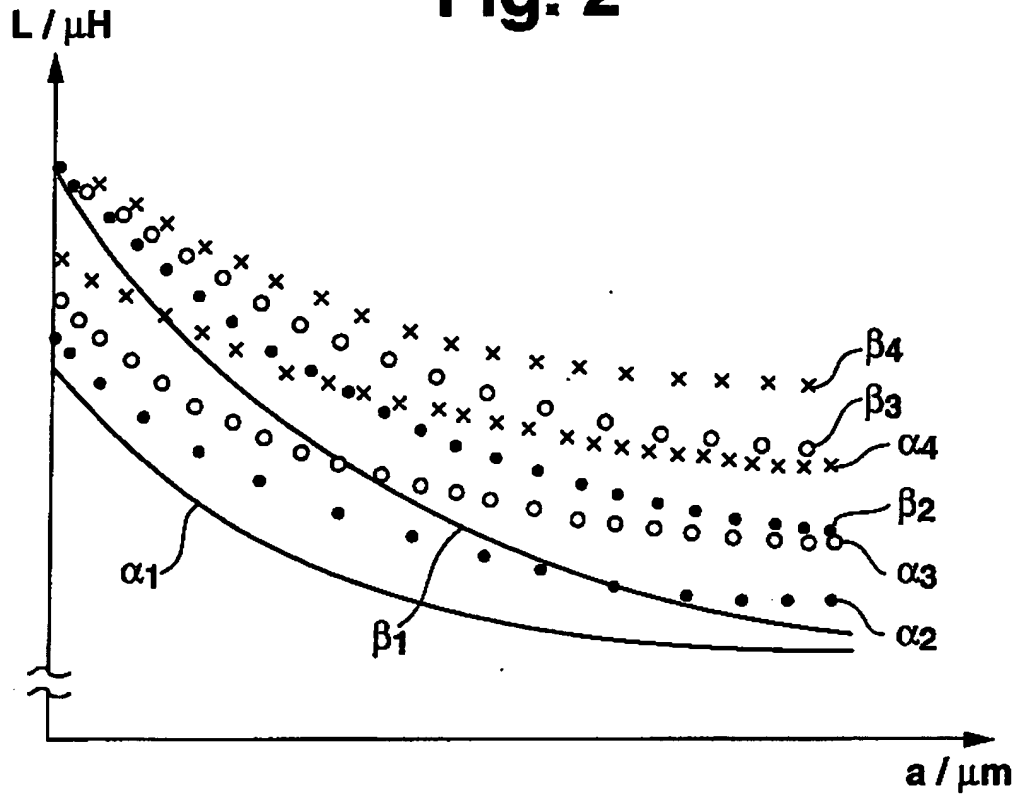
65



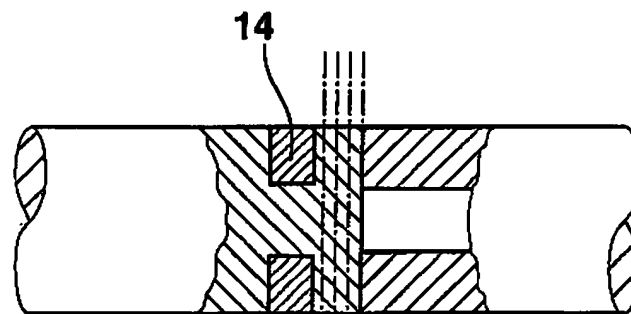
- Leerseite -

**Fig. 1**

**Fig. 2**



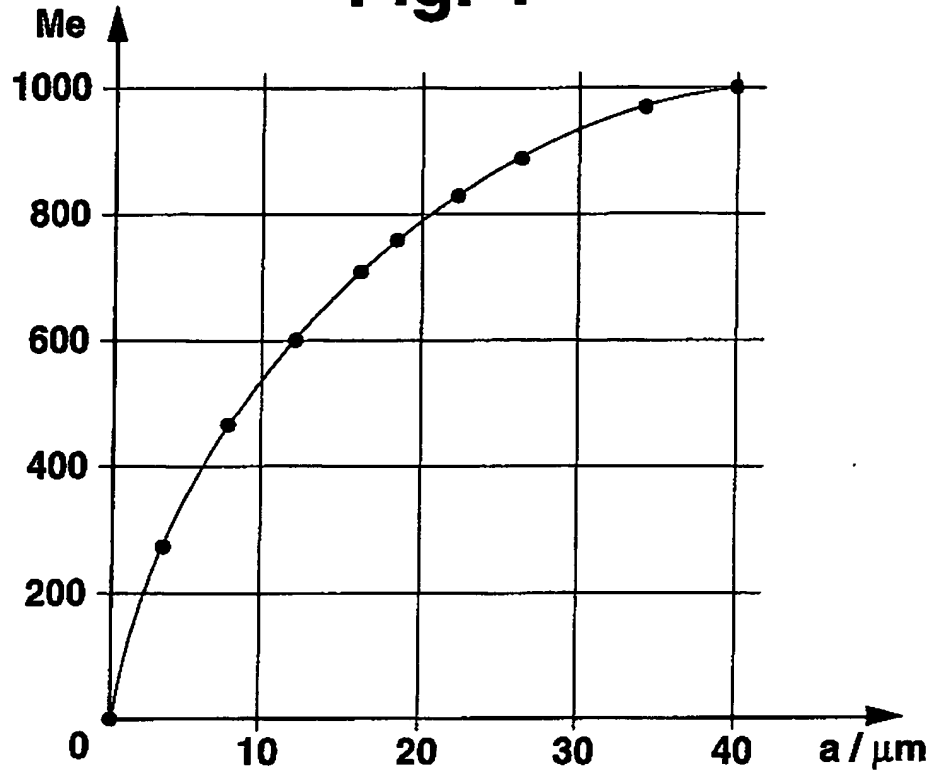
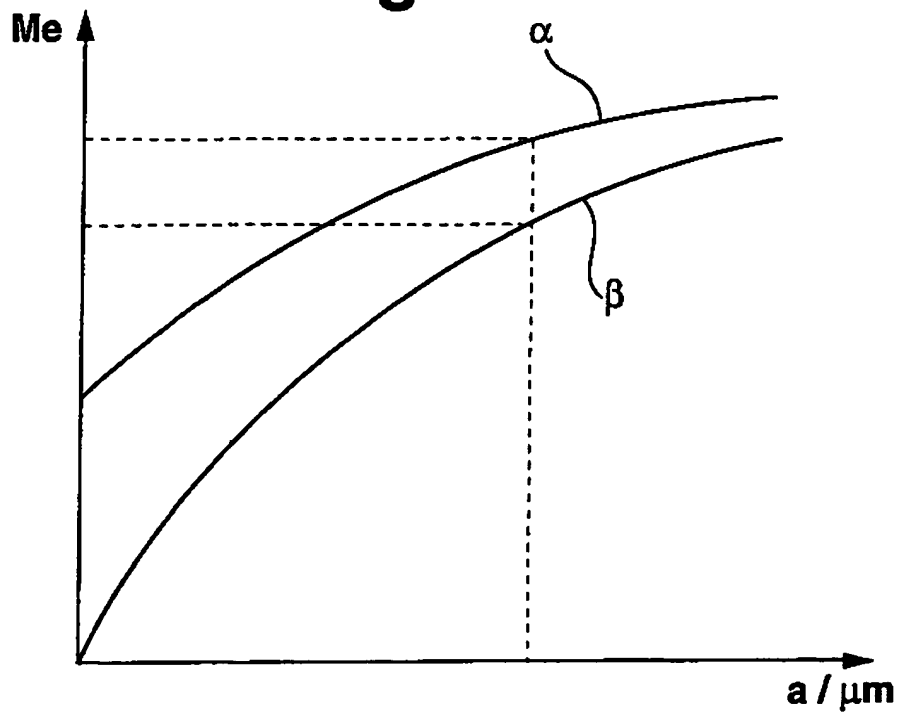
**Fig. 3**

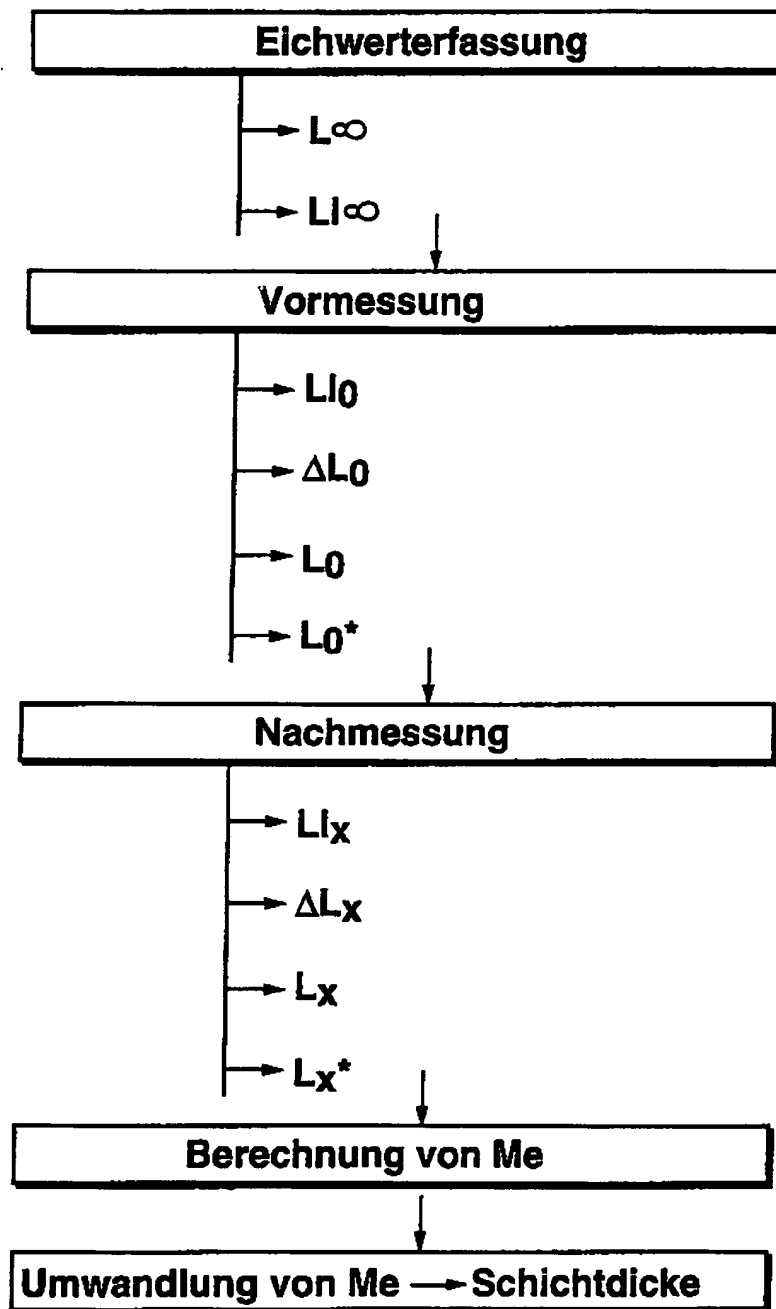


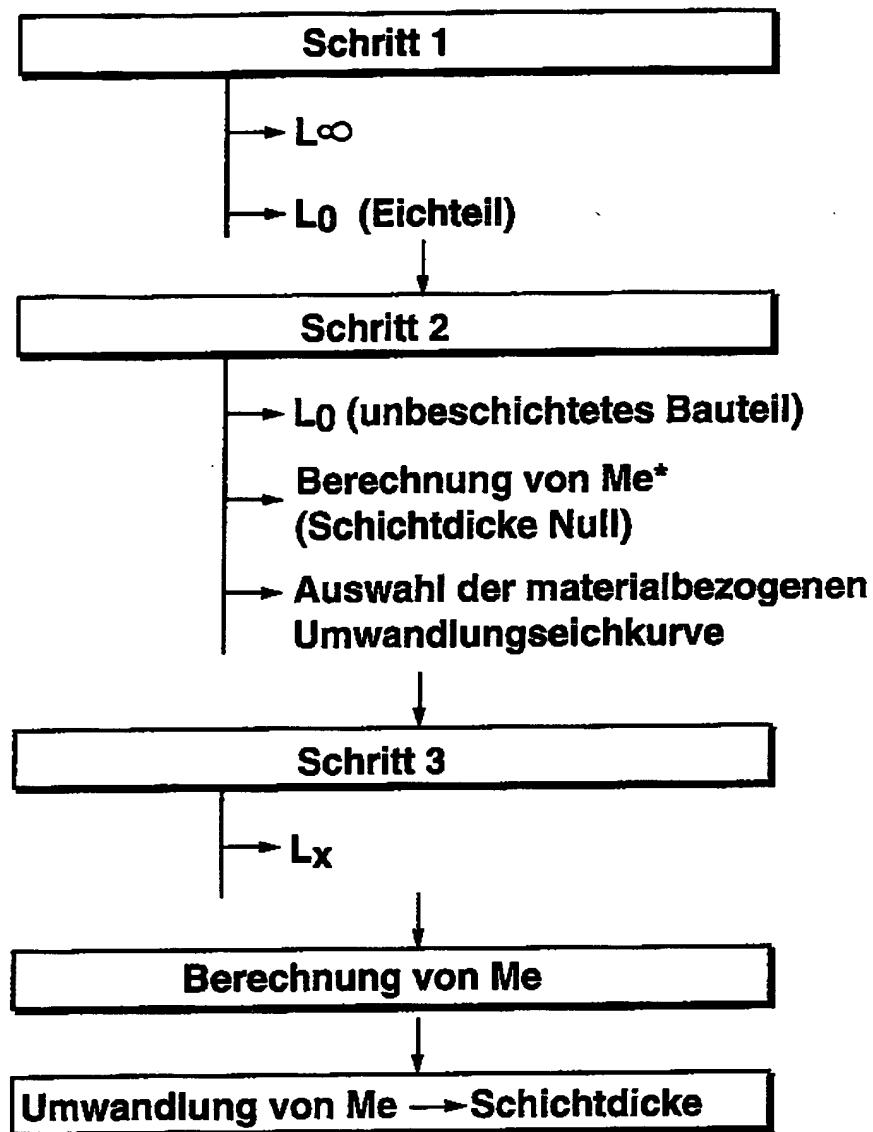
— ●●●● ○○○○ ××××

$\alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3 < \alpha_4$

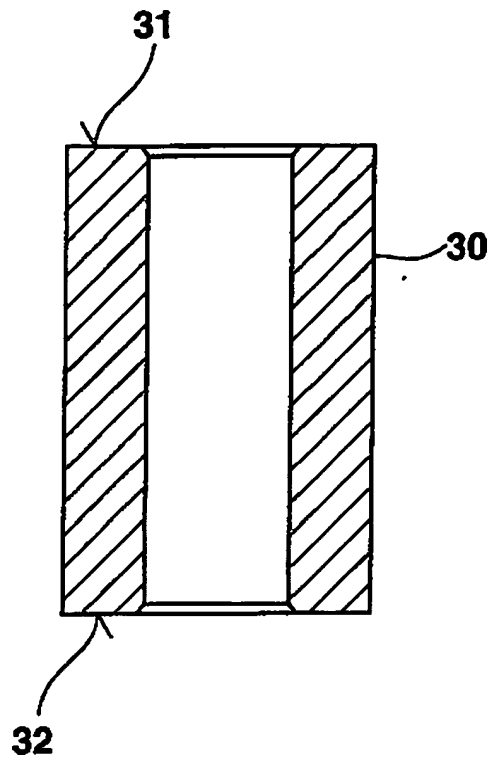
$\beta_1 < \beta_2 < \beta_3 < \beta_4$

**Fig. 4****Fig. 6**

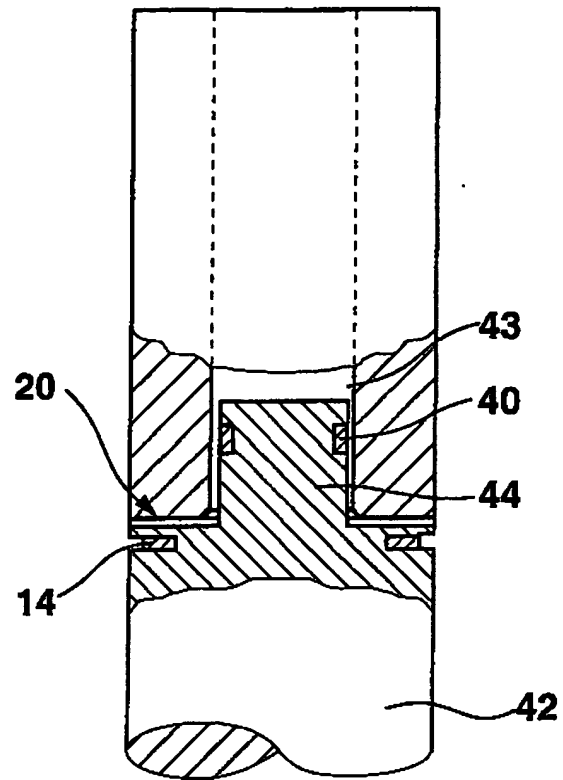
**Fig. 5**

**Fig. 7**

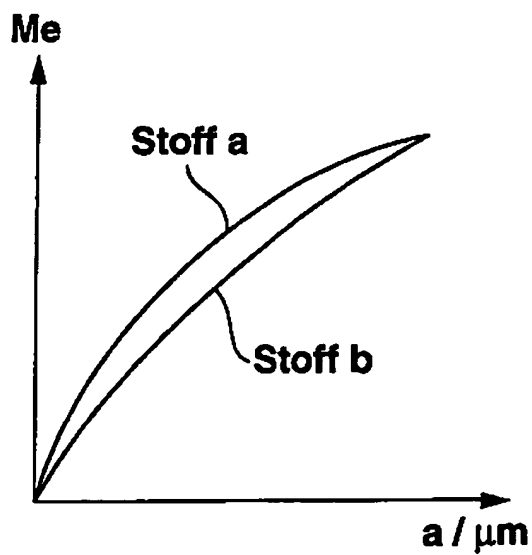
**Fig. 8**



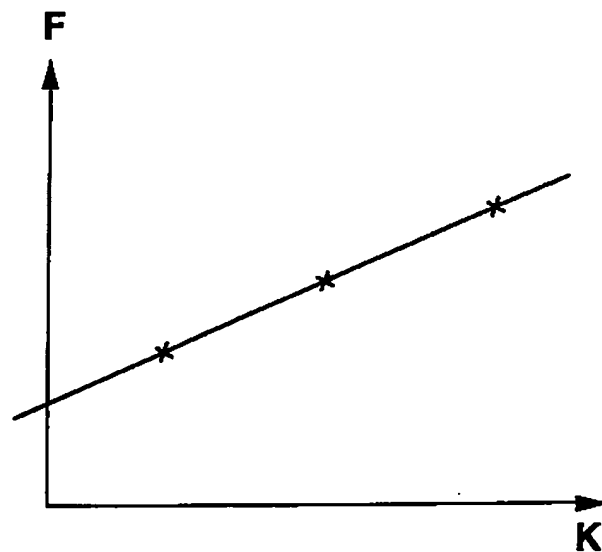
**Fig. 9**



**Fig. 10**



**Fig. 11**



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☒ **BLACK BORDERS**
- ☒ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☒ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☒ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**